

## **MODELADO DE OLEAJE EN ALTA RESOLUCIÓN EN CONDICIONES DE FETCH LIMITADO**

M. Alomar<sup>1</sup>, R. Bolaños Sánchez<sup>2</sup>, A. Sairouni<sup>3</sup>, A. Sánchez-Arcilla<sup>1</sup>

1. *Laboratori d'Enginyeria Marítima/ Universitat Politècnica de Catalunya (LIM/UPC), c/ Jordi Girona 1-3, Edif.D1, 08034 Barcelona. marta.alomar@upc.edu. agustin.arcilla@upc.edu.*
2. *Proudman Oceanographic Laboratory (POL), Joseph Proudman Building, 6 Brownlow Street, Liverpool L3 5DA, Reino Unido. rbol@pol.ac.uk.*
3. *Servei Meteorològic de catalunya (SMC), C/Berlín núm. 38-48 4<sup>a</sup>, 08029 Barcelona. asairouni@meteocat.cat.*

### **INTRODUCCIÓN**

El presente estudio pretende determinar la exactitud de las predicciones de oleaje en condiciones de fetch limitado usando el código SWAN de alta resolución en la costa catalana. Para ello se han usado registros de oleaje obtenidos durante la campaña RIMA-Med. En esta campaña se instrumentó una zona costera no mareal durante otoño-invierno 2007. Las observaciones se han comparado con estimaciones de modelos operacionales y de modelos de alta resolución. La sensibilidad del modelo de oleaje a los campos de viento se ha analizado forzando el modelo con vientos observados y vientos predichos.

Los modelos de oleaje generado por viento cerca de la costa están limitados por características a pequeña escala en los campos de viento debidas principalmente a la orografía y a la interfase tierra-mar. La costa noreste peninsular es un claro ejemplo donde los modelos de oleaje son imprecisos, generando errores en las predicciones de la altura significativa ( $H_s$ ) que alcanzan los 2m de bias. Diversos autores han señalado que un aumento de la resolución comportaría un aumento de la velocidad del viento y una disminución de las sub-predicciones de altura de ola comúnmente observadas (Signell et al. 2005; Cavaleri and Bertotti 2004). Los resultados del presente estudio muestran que una mayor resolución de los modelos, en condiciones

de fetch limitado, efectivamente comporta una sobre-predicción del viento pero también una inesperada sub-predicción de la altura de ola. El estudio de la sensibilidad del modelo a los campos de viento permitió identificar una posible transferencia ineficiente de energía hacia las olas durante el crecimiento del oleaje en la zona de estudio.

## Área de estudio

La zona de estudio se encuentra al sur de la costa catalana, en el Mediterráneo noroccidental (véase Figura 1). El área se caracteriza por una orografía compleja en la que los Pirineos al norte y una serie de valles fluviales y cadenas montañosas paralelas a la costa favorecen la canalización de los vientos del N en dirección NW hacia mar a dentro. Estos vientos son particularmente intensos en otoño e invierno y se denominan localmente Mestral. Los vientos del E son también muy frecuentes y más intensos, lo que genera las mayores alturas de ola registradas en la región. El oleaje característico coincide con las direcciones de viento predominantes (E, NW y S (sobretudo en verano)). En la zona de estudio destaca la existencia de oleajes bimodales (swell del E y sea del NW) (Sánchez-Arcilla et al. 2008).

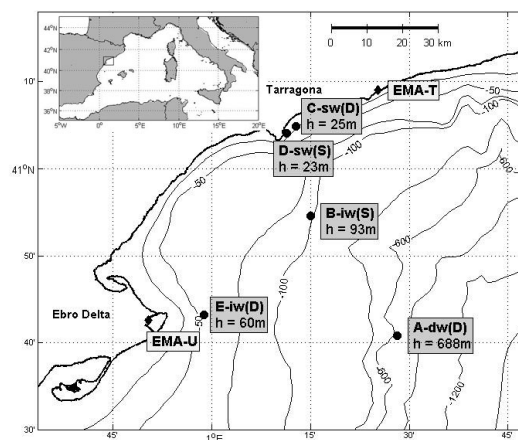


Figure 1. Mapa de la zona de estudio y localización de los instrumentos de medida.

## METODOLOGÍA

### Campanya RIMA-Med

Dentro del proyecto nacional RIMA se llevó a cabo la campaña instrumental RIMA-Med con el objetivo de instrumentar una zona costera-portuaria con frecuentes condiciones de crecimiento de oleaje limitado por fetch y espectros bimodales. Dentro de RIMA-Med se colocaron dos instrumentos a distintas profundidades (B-iw(S) y C-sw(D); véase Figura 1). El nombre dado a cada boya contiene una letra en mayúsculas de referencia, seguida de un par de letras en minúsculas que indican la profundidad de fondeo (*dw*, *iw*, *sw* – aguas profundas, intermedias y someras) y una letra entre paréntesis que se refiere a la naturaleza direccional (D) o escalar (S) de las medidas tomadas. Además, se tomaron datos registrados en instrumentos situados permanentemente en la zona de estudio y pertenecientes a Puertos del Estado (A-dw(D) y D-sw(S)) y a la red XIOM (E-iw(D)). También se usaron observaciones de velocidad del viento (WS) y dirección registradas en la boya exterior A-dw(D), y en las estaciones costeras de Torredembarra (EMA-T) e Illa de Buda (EMA-U), pertenecientes al Servicio Meteorológico de Cataluña (SMC) (véase Figura 1).

La campaña de medidas RIMA-Med tuvo lugar entre el 30 de octubre de 2007 y el 10 de enero de 2008. Debido a problemas operativos, no se obtuvieron observaciones simultáneas en todos los instrumentos. En concreto, no se registraron datos en A-dw(D) y B-iw(S) durante 15 - 30 días respectivamente en noviembre ni en C-sw(D) en diciembre y enero.

## **Modelos de viento y oleaje**

La predicción operacional en la costa catalana durante RIMA-Med consistía en el modelo atmosférico MASS (Meso-scale Atmospheric Simulation System) (Codina et al. 1997) y el modelo de oleaje de tercera generación WAM (Monbaliu et al. 2000). La resolución espacial era de 18km y la resolución temporal de 6h, con un horizonte de predicción a +48h y dos pases diarios. Los modelos fueron implementados por el SMC y el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM/UPC).

El modelo atmosférico de alta resolución usado en la segunda parte de este trabajo es el MM5 (Grell et al. 1994). Los campos vientos a 4km de resolución espacial y 3h de resolución temporal fueron obtenidos por el SMC anidando tres veces el modelo (36, 12 y 4km) a los campos de reanálisis diarios del ECMWF. Actualmente el modelo MM5 funciona de forma operacional en el SMC. El modelo de oleaje usado a alta resolución es el SWAN Cycle III, versión 40.72A (Ris 1997). La malla incluye la costa catalana con una resolución espacial de 1km y los vientos del MM5 de mayor resolución (Pase

1; véase Tabla 1). El modelo SWAN se seleccionó de acuerdo con Bolaños et al. (2007) que concluyeron que en la zona de estudio SWAN predecía ligeramente mejor los parámetros integrados del oleaje que WAM, a costa de una estimación no tan precisa de la forma del espectro.

## Análisis de sensibilidad del modelo al viento

Para el estudio de la sensibilidad del modelo de oleaje de alta resolución a los campos de viento se usaron distintas fuentes de viento de entrada (véase Tabla 1). En primer lugar se utilizaron datos de viento real medido en las estaciones meteorológicas para forzar todo el dominio de forma homogénea con los valores puntuales de cada estación (Pase 2). En el Pase 3, se usaron los valores máximos del viento predicho entre A-dw(D) y la costa (el fetch) de forma homogénea en toda la malla. En el Pase 4, y de acuerdo con Cavaleri and Bertotti (1997), se seleccionó un valor entre 1 y 1.5 con el que calibrar los valores de viento del Pase 1 (para mejorar la estimación del oleaje). Por último, en el Pase 5 se cambió la formulación por defecto de SWAN para el cálculo de la entrada y la disipación de energía del oleaje debidas al viento (Komen et al. 1984; de ahora en adelante KOM) por la formulación de Janssen (1989) y Janssen (1991) (de ahora en adelante JAN). En KOM el crecimiento del oleaje es independiente del estado inicial del oleaje. En JAN la transferencia de energía hacia el oleaje aumenta para estados de mar más desarrollados. JAN se usa por defecto en el modelo de oleaje WAM.

Pase		Vientos	Distribución espacial	Resolución temporal	Settings SWAN	$T_p$	$H_s$ (2º pico)
Pase 1		MM5	Variable	3h	KOM	- 26%	- 17%
	2.1	A-dw(D)	Homogéneo	1h	KOM	- 38%	- 42%
Pase 2	2.2	EMA-T	Homogéneo	1h	KOM	- 59%	- 78%
	2.3	EMA-U	Homogéneo	1h	KOM	- 68%	- 75%
Pase 3		Max WS	Homogéneo	1h	KOM	- 15%	+ 1%
Pase 4	4.1	1.1*MM5	Variable	3h	KOM	- 22%	- 2%
Pase 5		MM5	Variable	3h	JAN	- 18%	+ 75%
WAM		MASS	Variable	6h	JAN	+ 13%	- 21%

*Tabla 1. Pases del modelo de alta resolución SWAN usando diferentes fuentes de viento para modelizar el temporal 3. La última fila es información relativa a los modelos operacionales durante el mismo periodo de tiempo.*

## RESULTADOS

### RIMA-Med

Durante RIMA-Med se registraron 5 temporales de oleaje (véase Tabla 2). La selección e identificación de temporales se basó en los métodos cuantitativos revisados en Sánchez-Arcilla et al. (2008) y en una identificación visual en la que se asoció el principio y el fin de el temporal con el incremento y decremento acusados de la altura de ola significativa ( $H_s$ ).

En la Tabla 2 destaca la ocurrencia de temporales de oleaje tipo bimodal. En 3 de 5 temporales predominaron las condiciones de oleaje bimodal: mezcla de sea (NW) y swell (E), de acuerdo con los resultados presentados por Sánchez-Arcilla et al. (2008) y Bolaños et al. (2009). Además, y aunque no se muestra, el análisis de las series temporales de  $H_s$  y periodo de pico ( $T_p$ ) señala la existencia de una alta variabilidad espacial dentro de la limitada área de estudio ( $60\text{Km}^2$ ). Por una lado, se observa una desviación de la dirección de pico de casi  $30^\circ$  entre A-dw(D) y E-iw(D). Por otro lado, durante condiciones de fetch limitado se observan diferencias significativas en la altura de ola entre las dos boyas de fetch similar (E-dw(D) y B-iw(S)). También se observaron picos de  $H_s$  no homogéneos espacialmente. Esta variabilidad en las observaciones de oleaje se asocia a la variabilidad espacial de los campos de vientos y a la complejidad de la topografía y la batimetría. Estos resultados refuerzan la importancia de reproducir correctamente la variabilidad espacial de los campos de viento (alta resolución) a la hora predecir el oleaje local.

Ref.	Fecha de inicio y fin	Tipo espectral	Dirección de pico	$H_s$ máxima en E-iw(D)
1	14 - 18.11.2007	Predomina bimodal	NW + E	2.1m
2	24 - 30.11.2007	Predomina bimodal	NW + E	1.7m
3	07 - 13.12.2007	Predomina unimodal	NW	2.3m
4	15 - 25.12.2007	Unimodal	E	4.1m
5	03 - 06.01.2008	Ligeramente bimodal	NW + S + E	2.4m

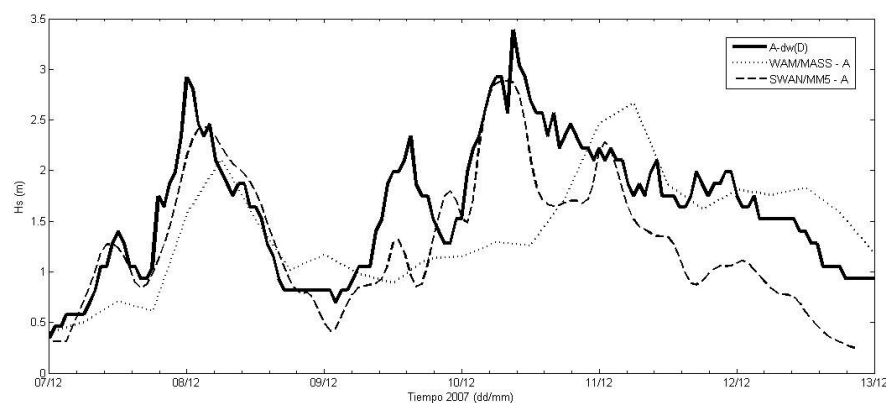
*Tabla 2. Características de los temporales de oleaje registradas durante RIMA-Med.*

La segunda parte de este trabajo se centra en el estudio del temporal 3, que se caracteriza por unas condiciones de oleaje principalmente unimodales generadas por

viento offshore del NW. Es decir, condiciones de crecimiento limitado por fetch. Este temporal se caracterizó por dos picos de  $H_s$ . El valor máximo en A-dw(D), la boya de mayor fetch (55km), alcanzó los 3.4m (véase Figura 2). En B-iw(S) y E-iw(D)  $H_s$  alcanzó valores máximos de 2.3m para un fetch de 20km. Los valores medios de  $T_p$  en A-dw(D) rondaron los 6s.

## Modelos de viento y oleaje

Las predicciones de los modelos operacionales de viento y oleaje (MASS y WAM) fueron poco consistentes. En ocasiones se sobre-predijeron los vientos en A-dw(D), con lo que  $H_s$  también se sobre-predijo (i.e. temporal 2: >50% sobre-predicción de  $H_s$  (no se muestra). En otras ocasiones, tanto viento como oleaje se sub-predijeron (i.e. temporales 3 y 4 cuya sub-predicción de  $H_s$  alcanzó 25 y 30% en el pico del temporal (véase Figura 2). De la predicción operacional del temporal 5 destaca la no reproducción del swell durante la segunda mitad del temporal, traduciéndose en una sub-predicción de  $H_s$  del 66% (no se muestra). La predicción del  $T_p$  también es diversa ya que se observa una sobre-predicción de aprox.12% durante los tres primeros temporales, y una sub-predicción de 10-20% durante los dos últimos temporales. Estos resultados apuntan hacia una sobre-predicción de  $T_p$  de oleajes en crecimiento y a una sub-predicción de oleajes completamente desarrollados.



*Figura 2. Observaciones de  $H_s$  en A-dw(D), y predicciones del modelo operacional de menor resolución (WAM) y el modelo de mayor resolución (SWAN) durante el temporal 3 (7-13 de diciembre de 2007).*

El uso de modelos de mayor resolución (MM5 y SWAN) para modelizar el temporal 3 (limitado por fetch) permitió obtener una mejora de la predicción de  $H_s$ . El modelo atmosférico sobre-predijo los vientos entre un 110%, en las estaciones costeras, y un

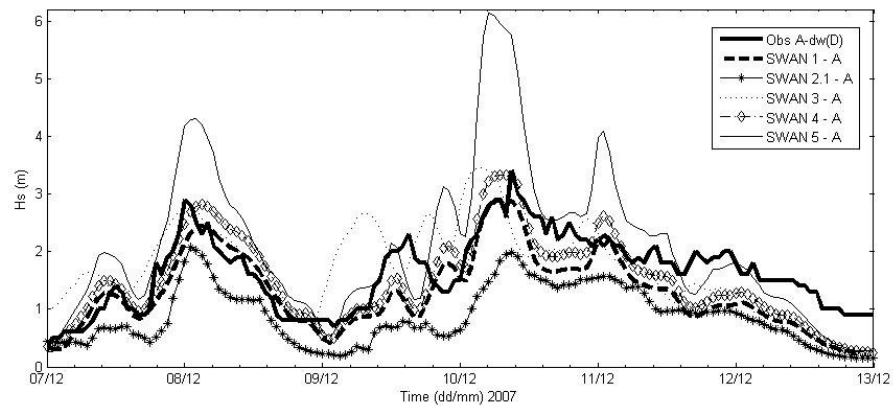
25% en A-dw(D) (no se muestra). La sub-predicción de  $H_s$  en A-dw(D) y en el pico del temporal disminuyó hasta en un 8% (del 25% pasó al 17%) (véase Figura 2). En cambio, SWAN sub-predijo  $T_p$  en un 26% frente al 12% de sobre-predicción obtenida mediante el modelo operacional de menor resolución WAM. Sin embargo, la validación del modelo usando  $T_p$  es poco adecuada, sobretodo para estados bimodales (incluso ligeramente) durante los que la 'estabilidad' de la variable se reduce. De estos resultados se concluye que el aumento de la resolución sobre-estima los vientos, lo que se traduce en un mejor predicción de  $H_s$  y sub-estima el  $T_p$ .

Las predicciones del temporal 3 obtenidas mediante el modelo de alta resolución reprodujeron muchas de las diferencias espaciales descritas en el apartado anterior entre A-dw(D) y E-iw(D), y B-iw(S), y no resueltas por el modelo operacional debido a un mayor grosor de malla. Este resultado respalda la mejora significativa que aporta el uso de modelos de mayor resolución.

Por otro lado, la disponibilidad de observaciones en instrumentos con distinto fetch permitió evaluar las estimaciones del modelo de alta resolución con el fetch. De acuerdo con lo descrito anteriormente por Cavaleri y Bertotti (2004), se observó que la predicción mejora al aumentar el fetch tanto en términos de  $H_s$  como  $T_p$ . Este resultado apunta hacia una ineficiente transferencia de energía en el modelo durante el crecimiento del oleaje en fetch cortos.

### **Análisis de sensibilidad del modelo al viento**

Los resultados del estudio de los distintos pases del modelo usando distintas fuentes de viento se muestran en la Tabla 1 (cuantitativamente) y en la Figura 3 (gráficamente). Del Pase 2 destacan las sub-predicciones considerables (75-42%) que se obtuvieron al usar datos reales de viento registrados en las estaciones meteorológicas. Estudios anteriores al norte de la zona de estudio describieron un aumento del viento desde la línea de costa hacia mar abierto (Flamant et al. 2003). Este aumento del viento en la interfase tierra-océano explica las sub-predicciones que se obtienen con los datos de las estaciones costeras, pero no explica la sub-predicción que generan los datos de A-dw(D) con los que se esperaría una sobre-predicción importante de  $H_s$ . Este resultado apunta hacia la posible existencia de vientos más intensos en otro punto a lo largo del fetch. También es un indicador de la alta variabilidad espacial de los campos de vientos en la zona, a diferencia de lo anteriormente descrito por otros autores en el golfo de León (Flamant et al. 2003).



*Figura 3. Observaciones de  $H_s$  en A-dw(D), y predicciones del modelo de mayor resolución (SWAN) forzado con distintos campos de viento.*

En el Pase 3 se usaron los vientos máximos a lo largo del fetch aplicados de forma homogénea sobre todo el dominio. El resultado fue una buena aproximación de la magnitud de  $H_s$  y una disminución de la sub-predicción del  $T_p$  (hasta un 15%). También en el Pase 4 un aumento de los vientos del modelo en un factor de 1.1 genera una buena aproximación de  $H_s$  y una disminución, aunque menor, de la sub-predicción del  $T_p$  respecto al Pase 1 (hasta un 22%). La necesidad de aumentar los vientos ya de por sí sobre-estimados para mejorar las predicciones del oleaje refuerza la hipótesis de que para la zona de estudio, la formulación de transferencia de energía del viento hacia las olas en el modelo es ineficiente.

Por ello en el Pase 5 se cambió la formulación por defecto del modelo de oleaje y se usó JAN en vez de KOM. Pero el modelo no alcanzó la convergencia generando valores anormalmente altos de  $H_s$ . Este resultado indica que la implementación de la formulación JAN (originalmente desarrollada para WAM) en SWAN en condiciones no estacionarias es incorrecta. Algunos problemas de convergencia de JAN en SWAN se discuten en Niclasen (2006).

## CONCLUSIONES

Los datos obtenidos durante la campaña RIMA-Med proporcionan medidas de oleaje y viento en una zona de  $60\text{Km}^2$  durante más de dos meses a finales de 2007. Estos datos son de gran utilidad para el estudio del crecimiento del oleaje tanto en condiciones de fetch-limitado como durante estados bimodales, en una zona de



variabilidad espacial importante. En este estudio estos datos se han usado para evaluar la mejora de las predicciones de oleaje usando modelos de viento y oleaje de mayor resolución durante un evento de crecimiento del oleaje limitado por fetch.

El análisis de los modelos operacionales demuestra que todavía es necesario mejorar significativamente las predicciones operacionales de oleaje en la zona de estudio. Concretamente, durante un caso de fetch-limitado registrado en diciembre de 2007 la estimación operacional sub-predijo  $H_s$  en el pico de la tormenta en un 25%. En general,  $T_p$  se sobre-estimó en casos de generación del oleaje y estados bimodales (12%) pero se sub-estimó en casos de oleajes desarrollados. Algunos autores como Signell et al. (2005) apuntan a un incremento de la resolución como la solución a las sub-predicciones de los modelos en cuencas cerradas. En este estudio mostramos que la mejora asociada al incremento de resolución en condiciones de fetch limitado tampoco es suficiente. El modelo de oleaje a 1km de resolución redujo la sub-predicción de  $H_s$  pero sólo hasta un 17% (para vientos sobre-estimados en un 25%).

El análisis de la sensibilidad a los campos de viento ha demostrado por un lado la importancia de la variabilidad espacial proporcionada por los modelos. Por el otro lado ha puesto de relevancia un modelado ineficiente de la transferencia de energía desde el viento hacia las olas más acusada en fetch cortos. En la región de estudio el oleaje parece crecer más deprisa de lo contemplado por las formulaciones teóricas disponibles en la actualidad y una posible razón es la alta variabilidad espacial de la zona.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este estudio se ha realizado dentro del proyecto RIMA (MEC-TRA2006-05132/TMAR) y con la ayuda adicional del proyecto europeo MARIE (MTKD-CT-2004-014509). Los datos de las boyas fueron proporcionados por la red XIOM y Puertos del Estado. Los datos meteorológicos fueron proporcionados por el SMC y el ECMWF.

## **REFERENCES**

- Bolaños, R., A. Sanchez-Arcilla and J. Cateura. 2007. Evaluation of two atmospheric models for wind-wave modelling in the NW Mediterranean. *J. Marine Syst.* 65: 336-353.
- Bolaños, R., G. Jorda, J. Cateura, J. Lopez, J. Puigdefabregas, J. Gomez and M. Espino. 2009. The XIOM: 20 years of a regional coastal observatory in the Spanish Catalan coast. *J. Mar. Syst.* 77: 237-260.
- Cavaleri, L. and L. Bertotti. 1997. In search of the correct wind and wave fields in a minor basin. *Mon. Weather Rev.* 1964-1975.
- Cavaleri, L. and L. Bertotti. 2004. Accuracy of the modelled wind and wave fields in enclosed seas. 56: 167-175(9).
- Codina, B., M. Aran, S. Young and A. Redaño. 1997. Prediction of a mesoscale convective system over Catalonia (Northeastern Spain) with a nested numerical model. *Meteorol. Atmos. Phys.* 62: 9-22.
- Flamant, C., J. Pelon, D. Hauser, C. Quentin, W. M. Drennan, F. Gohin, B. Chapron and J. Gourrion. 2003. Analysis of surface wind and roughness length evolution with fetch using a combination of airborne lidar and radar measurements. *J. Geophys. Res.* 108.
- Grell, G. A., J. Dudhia and D. R. Stauffer. 1994. Description of the fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5).
- Janssen, P. A. E. M. 1989. Wave-induced stress and the drag of air flow over sea waves. *J. Phys. Oceanogr.* 19: 745-754.
- Janssen, P. A. E. M. 1991. Quasi-linear theory of wind-wave generation applied to wave forecasting. *J. Phys. Oceanogr.* 21: 1631-1642.
- Komen, G. J., K. Hasselmann and K. Hasselmann. 1984. On the existence of a fully developed wind-sea spectrum. *J. Phys. Oceanogr.* 14: 1271-1285.
- Monbaliu, J., R. Padilla-Hernandez, J. C. Hargreaves, J. C. C. Albiach, W. Luo<sup>1</sup>, M. Sclavo and H. Günther. 2000. The spectral wave model, WAM, adapted for applications with high spatial resolution. *Coast. Eng.* 41: 41-62.
- Niclasen, B. A. 2006. An operational wave model for the Faroe Shelf. . University of the Faroe Islands.
- Ris, R. 1997. Spectral modelling of wind waves in coastal areas. Delft University Press.
- Sánchez-Arcilla, A., D. González-Marco and R. Bolaños. 2008. A review of wave climate and prediction along the Spanish Mediterranean coast. *Nat. Hazard. Earth Sys.* 8: 1217-1228.
- Signell, R. P., S. Carniel, L. Cavaleri, J. Chiggiato, J. D. Doyle, J. Pullen and M. Sclavo. 2005. Assessment of wind quality for oceanographic modelling in semi-enclosed basins. *J. Marine Syst.* 53: 217-233.